干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2018.05.13

中条山北麓河流地貌参数及其新构造意义①

徐　伟，　袁兆德，　刘志成，　高战武

（中国地震灾害防御中心，北京　100029）

摘　要：基于数字高程模型（DEM）及地理信息系统（GIS）技术，系统提取和分析了中条山北麓河流坡降指标、河道陡峭指数及面积高程积分等河流地貌参数。研究表明：河流坡降指标、河道陡峭指数及面积高程积分在永济至解州一带表现出较高的值；综合分析岩性、降水及构造等因素可知，新构造运动是控制中条山北麓河流地貌发育的主要因素，自北向南总体表现出增强的趋势，在永济南活动最强。前人研究表明，中条山北麓断裂晚第四纪以来构造活跃，全新世以来仍有多次活动，但不同部位活动强度各异，解州段晚更新世晚期以来滑动速率相比韩阳段及夏县段高，极高值在出现在永济南一带。可见，基于河流地貌参数获得的中条山北麓新构造运动强弱与断裂晚第四纪以来的活动强弱一致。

关　键　词： 中条山北麓；河流地貌参数；新构造运动

中图分类号： P931.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**

近年来，随着地理信息系统技术及数字高程模型数据的不断发展，国内外关于河流地貌参数的新构造运动研究取得了重要的进展[1-6]。许多河流地貌参数被用以定量描述、解析造山带的地表形态及演变过程，探讨其成因。目前利用不同河流地貌参数对新构造运动进行分析已经取得了诸多的研究成果[3,6-12]。中条山北麓河流发育，河流地貌记录了新构造运动的重要信息，对多河流地貌参数进行研究，有助于对该区的新构造运动有更直观的认识。目前前人对该区的研究主要集中在中条山北麓断裂的形变异常、展布特征、晚第四纪滑动速率、新构造运动以及古地震等方面[13-20]，而对中条山北麓河流地貌参数方面的研究相对薄弱，程绍平等[15]对中条山北麓水系长度及冲沟比降指标进行了分析，显示出沿断裂走向呈现出分段变化的趋势；慈洪娟等[21]对中条山北麓韩阳段6条冲沟的发育及其新构造意义进行了分析，显示出韩阳段自北向南新构造运动呈现逐渐增强的趋势。本文基于25 m分辨率DEM数据，提取了横跨中条山北麓断裂带的河流及基岩区流域盆地，利用ArcGIS空间分析技术提取多种河流地貌参数，结合断裂活动特征，探讨中条山北麓河流地貌参数及其新构造运动意义。

1　区域概况

运城盆地是山西地堑系西南端的一个断陷盆地，总体呈NE走向，北部与峨嵋台地相邻，西部隔黄河与渭河盆地相望，南部与东部为中条山（图1）。

运城盆地在燕山运动后到古近纪长期处于相对稳定、遭受剥蚀的状态，在新构造运动影响下，区域格局发生了较大的变化[22]。磷灰石裂变径迹研究表明，中条山在早新生代隆升缓慢，快速隆升始于7.5 Ma左右[23]。晚新生代以来，发生了强烈的新构造运动，盆地下陷并开始接受深厚沉积[22]。靠近中条山的区域是盆地下沉最强烈的地区，目前仍发育湖泊洼地，地震勘探资料揭示盆地新生界厚度达5 000 m以上，钻孔古地磁研究表明第四纪沉积厚度在400 m以上，为南深北浅的半地堑式盆地[17,24]。

中条山北麓断裂位于运城盆地与中条山之间，断裂南起首阳，向北经解州、运城、夏县至柏范底，全长约130 km，走向NE，断面倾向NW，倾角60°～80°，为高角度正断层。根据断裂走向及几何不连续，以西姚温及磨河为界将断裂分成南段（韩阳

① 收稿日期：2018－05－25；　修订日期：2018－07－20
基金项目：地震科技星火计划项目（XH15053Y）
作者简介：徐伟（1986－），男，助理研究员，硕士，研究方向为活动构造、构造地貌. E-mail：xwazhy@163.com

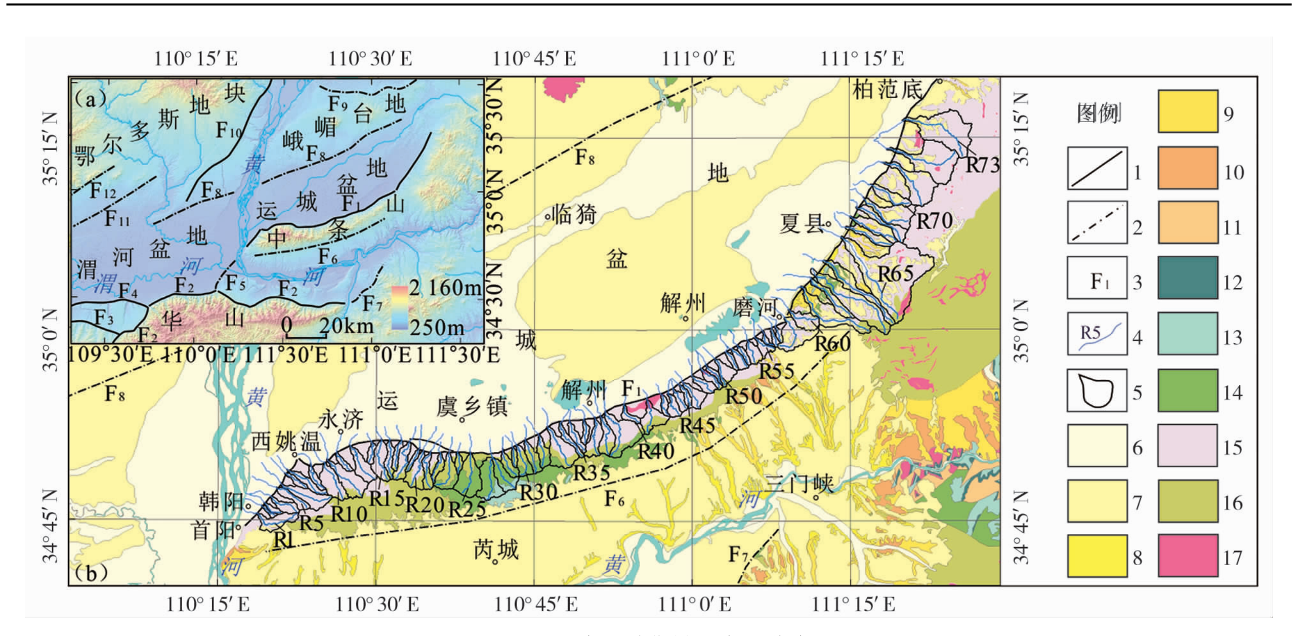


图 1 区域地质背景及水系分布

Fig. 1 Regional geological setting and rivers

1 地表出露断裂;2 隐伏断裂;3 断裂编号(F1 中条山北麓断裂、F2 华山山前断裂、F3 骊山山前断裂、F4 渭南塬前断裂、F5 潼关塬西缘断裂、F6 中条山南麓断裂、F7 温塘断裂、F8 临猗 - 双泉断裂、F9 峨嵋台地北缘断裂、F10 韩城断裂、F11 扶风—三原—蒲城断裂、F12 益店—乾县—美原断裂);4 水系及编号(为减小图面负担,水系编号以 5 为间隔进行标注,下同);5 基岩区流域盆地;6 全新统(冲洪积砂砾石、亚砂土);7 中上更新统(黄土状亚砂土、砂质土及砂砾石);8 下更新统(黄土状亚粘土、砂及砂质粘土);9 新近系(砂质粘土及红色粘土);10 古近系(泥岩、砂质泥岩);11 二叠系(页岩、泥岩夹煤层);12 石炭系(页岩、砂岩夹灰岩及煤层);13 奥陶系(灰岩、砂岩夹页岩、);14 寒武系(灰岩、碳酸盐岩夹页岩);15 太古界(花岗质侵入岩、混合岩、石英岩及大理岩);16 元古界(绿片岩、砂岩、泥岩夹页岩);17 花岗岩

段)、中段(解州段)及北段(夏县段)[13,15-16]。早期研究认为断裂仅中段在全新世有过活动[13,15]。近年来,北京大学李有利课题组对断裂进行了 1∶5 万填图,认为断裂全段均全新世活动,晚更新世晚期以来南、中、北三段的平均垂直滑动速率分别为 0.23 mm·a^{-1}、0.7~0.9 mm·a^{-1}及 0.22~0.55 mm·a^{-1}[16-17,20]。

2 数据及分析方法

本研究采用的 DEM 为国家测绘局提供的 1∶5 万数字高程模型数据。数据格网间距(分辨率)为 25 m。基于此数据,沿中条山北麓提取了 73 个主干河流水系及其所在的基岩区流域盆地,主干水系编号自南向北依次为 R1、R2、…、R72、R73(图 1),相应地,水系所在的基岩区流域盆地编号依次为 S1、S2、…、S72、S73。出水口位置为主干水系与中条山北麓断裂的交汇点。利用 ArcGIS、MATLAB 等软件,提取了河流坡降指标、河道陡峭指数及面积高程积分等河流地貌参数。综合分析影响这些参数的主要因素,结合区域构造背景、前人研究分析中条山北麓河流地貌参数及其新构造意义。

3 河流地貌参数提取

3.1 河流坡降指标

为定量反映河流纵剖面坡度的变化,HACK[25]在研究河流纵剖面时,提出了河流坡降指标(*SL* index),它是单位距离的坡度与河流源头距离的乘积(图 2)。$SL = (\Delta H/\Delta L)L$,其中,$\Delta H/\Delta L$ 为单位河段坡度,L 为河流源头至河段中点的距离。

河流的坡度在上游较陡峭,接近河口则较为平缓,因此上下游河段的坡度不能直接比较,所以坡降指标将各河段的坡度乘以与河流源头的距离,来放大下游河段坡度的数值,以此比较河流各河段的坡

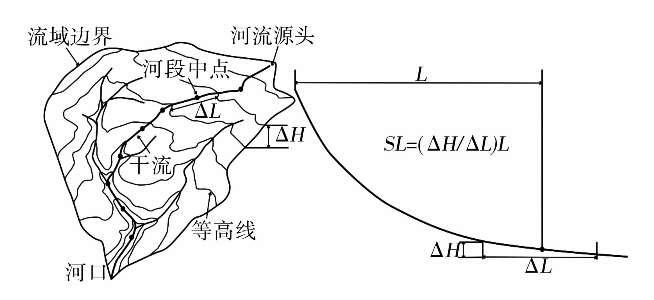


图 2 河流坡降指标计算示意图(修改自[3])

Fig. 2 Sketch of calculating stream gradient index (modified from[3])

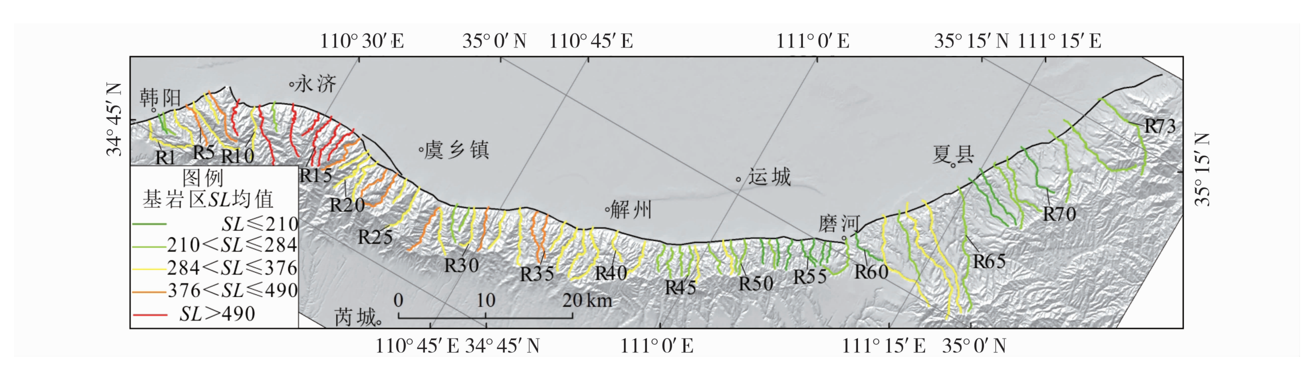


图 3　基岩区各水系 SL 均值空间展布

Fig. 3　Spatial distribution of mean value of each river stream length-gradient index

度变化。在一个集水流域内,均衡河流的坡降指标从源头到河口是保持不变的,当局部河段的坡降指标发生了变化,可以反映岩性或新构造运动的特征。

以 100 m 作为河段间隔步长,依次从上游至下游对 73 条河流的每一河段坡降指标进行了提取。计算结果表明,*SL* 值绝大部分介于 0 ~ 500 之间,均值为 330,超过 1 000 的河段仅占不到 5% 。*SL* 值超过 1 000 的河段主要集中在解州至永济一带以及磨河至夏县一带,其他部位零散分布。

诸多学者在对比不同河流的坡降指标时,对各河段的河流坡降指标 *SL* 值进行算术平均[4,12,26-27],取得了较好的研究成果。考虑到山前构造抬升主要影响基岩区的河流坡降指标,故对每条河流的基岩区河段 *SL* 值平均,并进行空间比对。从提取的结果来看,*SL* 均值最小为 129(R60),最大为 700(R16),均值为 326,空间上表现出自北向南逐渐增大的趋势,极大值出现在永济南一带(图 3)。

3.2　河道陡峭指数

在构造抬升强烈的地区,主要发育基岩河道或者基岩冲积—混合河道。河流的侵蚀力相对于基岩河道是一种剪应力,稳定态的河流比降与流域面积呈反比关系。国内外大量研究发现,尽管基岩河流发育的环境不同,但在局部河道比降 S 与流域面积 A 均符合幂函数关系[28-29]:$S = k_s A^{-\theta}$(图 4),式中:k_s 表示河道陡峭指数;θ 表示河道凹曲度。根据 SNYDER 和 KIRBY 等人发展的分析和方法[31-32],首先,我们基于 ArcGIS 系统,利用一系列 MATLAB 脚本程序,从 25 m 分辨率的 DEM 中提取河道高程和流域面积,再选用 250 m 的移动窗口对河道进行平滑并消除异常点、每隔 12.19 m 的垂直距离河道比降的计算。得到河道比降之后,根据公式 $\log S = -\theta \log A + \log k_s$ 对河道比降和流域面积进行反演回

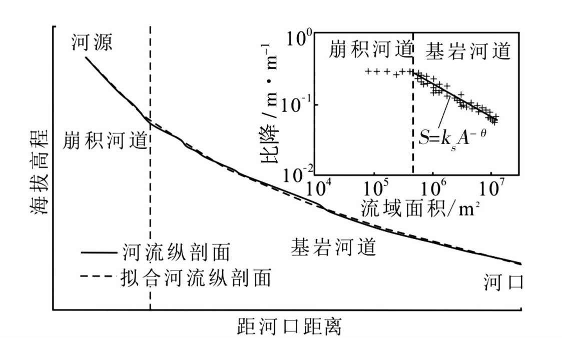


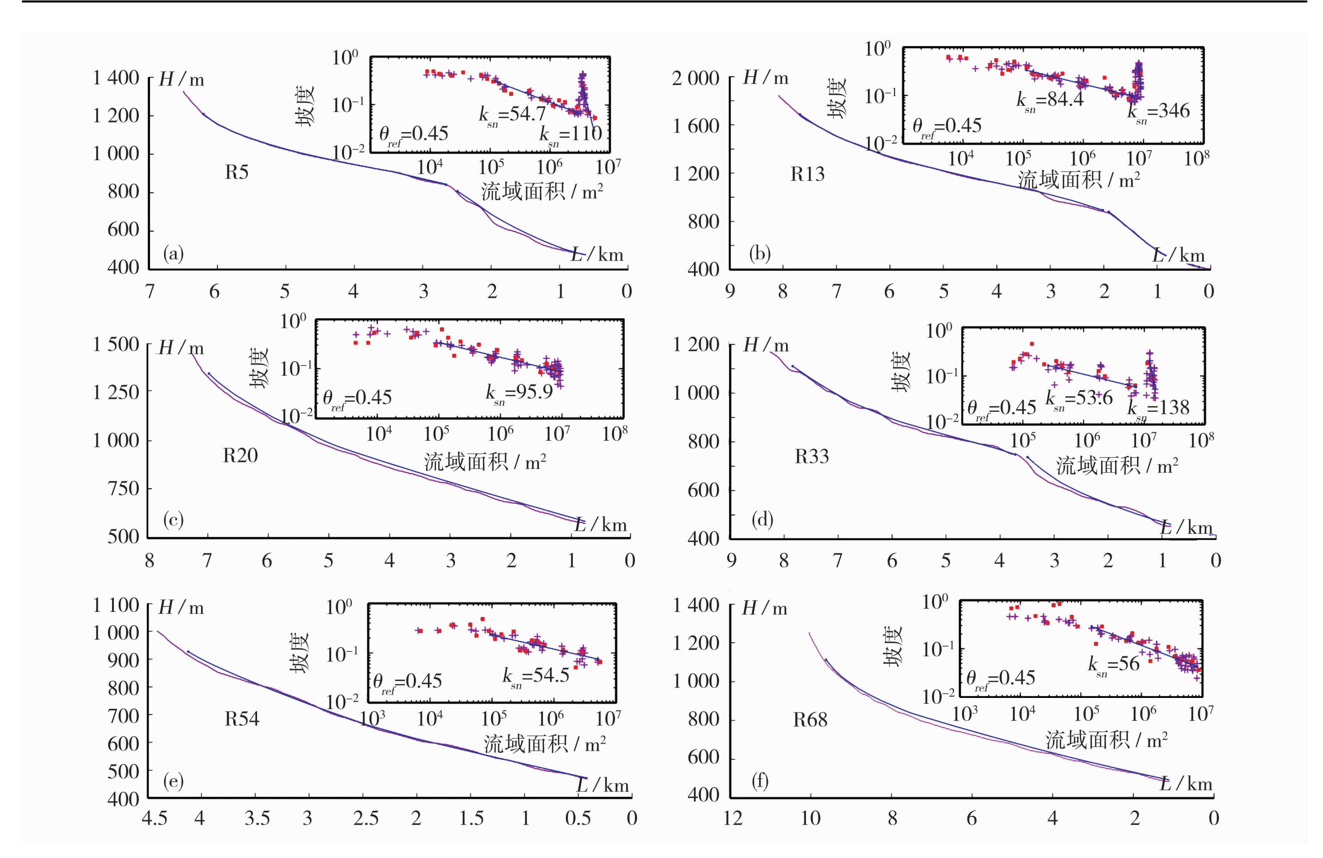
图 4　河流纵剖面与坡度—面积对数图(修改自[30])

Fig. 4　Longitudinal profile and log graph of gradient-area of a river(modified from[30])

归,得到河道的凹曲指数 θ 和陡峭指数 k_s。在进行反演计算时,回归分析限制于基岩河道部分,在河流源区的崩积河道部分,不进行回归分析。

为更好地对比不同河流之间的抬升速率,通常选取 0.45 作为参考凹曲指数 θ_{ref} 对河道陡峭指数进行标准化处理,利用分段拟合计算求出标准化陡峭指数 k_{sn}[30,32]。从提取的结果来看,在解州以南,从流域面积—坡度对数图可以看出,如 R5、R13、R33(图 5、图 6),该段线性关系不很理想,裂点发育,裂点两侧 k_{sn} 差异较大。从提取的裂点分布(图 6)可见,大致以解州为界,在解州以南密集发育,裂点的发育反映了抬升速率在空间或时间上的调整,河道长期处于构造隆升,未达到均衡状态;解州以北,从提取的流域面积—坡度对数图可见,该段大部分河流有理想的线性关系(如 R54、R68(图 5)),利用理论公式拟合出的河道纵剖面与实际河道纵剖面也比较吻合,裂点零星发育,表明河道已经达到或接近均衡状态。

从标准化陡峭指数 k_{sn} 空间分布图(图 6)可见,低值主要分布于解州以北,高值主要分布于解州以南,与河流坡降指标 *SL* 均值分布类似,空间上自北



注:紫色线为河道实际曲线,蓝色线为河道拟合曲线

图 5　典型部位河流纵剖面与坡度—面积对数图

Fig. 5　Typical longitudinal profiles and log graph of channel gradient-drainage area

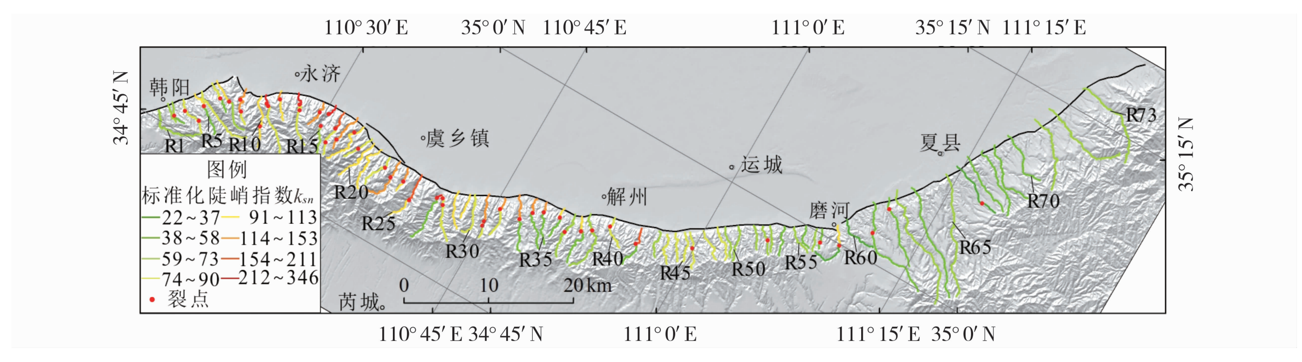


图 6　基岩区各河道标准化陡峭指数空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of the bedrock normalized channel steepness index (k_{sn}) of each stream

向南表现出逐渐增大的趋势,极大值出现在永济南一带。陡峭指数的变化反应了岩石抬升速率即新构造运动的差异,表明中条山北麓新构造运动自北向南逐渐增强,在永济一带最为活跃。

3.3　面积高程积分

面积高程积分对新构造运动十分敏感,是一种很好的判断流域盆地地貌及其对新构造运动响应的地貌指标,已被广泛应用于新构造运动与地貌发育研究中。

在戴维斯地貌旋回演化理论的基础上,STRAHLER [33] 提出了流域面积高程积分法,目前被广泛应用于侵蚀地貌发育阶段的定量研究,是反映流域地貌发育阶段与侵蚀关系的数学模型。面积高程积分值通常计算方法是:设定全流域面积为 A,流域内某条等高线以上的面积为 a,该等高线与流域最低点的高差为 h,流域最高点与流域最低点的高差为 H,记 $x=a/A$,$y=h/H$,显然 x,y 均在[0,1]内取值。根据一系列(x,y)值,以 x 为横坐标,y 为纵坐标绘制出的曲线即为面积高程积分曲线,曲线左下方与坐标轴所围起的面积为面积高程积分 HI 值

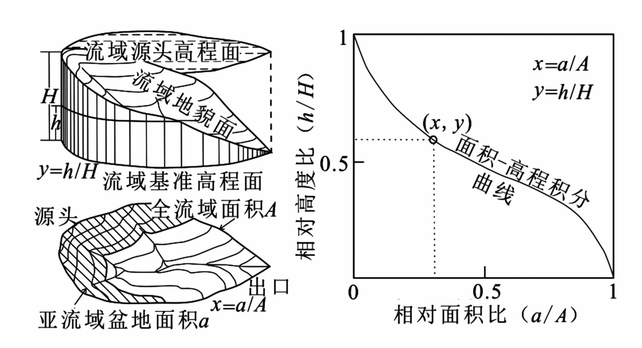


图 7　面积高程积分曲线计算示意图(修改自[33])

Fig. 7　Schematic diagram of calculating hypsometric integral curve (modified from[33])

(图 7)。

一般认为,在新构造运动活跃的地区,水系的发育受到干扰,流域常具有幼年期的特征,*HI* 值偏高;新构造运动稳定的地区,为各支流水系提供了足够的发展演化时空,流域常具有老年期的特征,*HI* 值偏低。因此比较各流域 *HI* 值高低,判断 *HI* 值异常偏高或偏低的地区,便可推测各流域新构造运动的强弱[34]。

本研究对中条山北麓 73 条河流所在的基岩区流域盆地进行了 *HI* 值的提取及面积高程积分曲线形态的分析。研究发现,所有流域的面积高程积分曲线形态均为“*S*”形,表明流域所在的流域盆地正处于幼年期至壮年期阶段,但曲线的凹凸程度不一:磨河以南面积高程积分曲线形态相比磨河以北更为上凸,相应地磨河以南 *HI* 值普遍 >0.5,极高值出现在永济南及解州南一带;磨河以北 *HI* 值普遍 <0.5(图 8)。

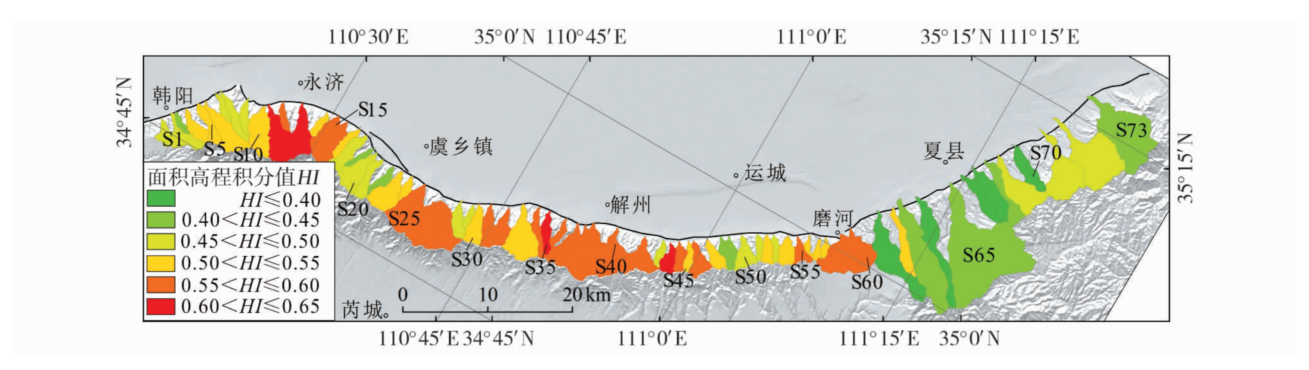


图 8　基岩区流域盆地面积高程积分值空间分布

Fig. 8　Spatial distribution of each drainage basin hypsometric integral value

4　影响因素分析

现今地貌是内动力和外动力长期作用的结果,区域岩性差异、气候变化、新构造运动等因素控制着地貌的演化。

4.1　岩性因素

流域盆地内不同的岩性组合产生不同的抗侵蚀力,从而影响流域的地貌演化。中条山北麓磨河以南各流域内岩性以太古界涑水群地层为主,主要由花岗质侵入岩、混合岩、石英岩以及透镜状大理岩组成,岩性抗侵蚀能力较强。在虞乡镇南还出露元古界震旦系、古生界寒武系至奥陶系地层,岩性主要为绿片岩、砂岩、碎屑岩、灰岩及页岩,抗侵蚀能力较差。磨河以北发育构造台地,主体仍为太古界涑水群地层,台地顶部上覆新生界新近系至第四系粘土、砂、亚砂土及砂砾石松散堆积(图 1)。

综合岩性分布,基岩在虞乡镇南一带抗侵蚀能力较差,如不考虑构造、降雨等因素,流域面积高程积分值在虞乡镇南一带相比其他部位应偏低,实际这一特征表现的并不显著。面积高程积分值低值主要分布于磨河以北,基岩区河流坡降指标均值、标准化陡峭指数及面积高程积分值自北向南表现出逐渐增高的趋势,这一特征与岩性变化并不一致,另外在虞乡镇南上述地貌参数指标相比两侧并没有显著的变化,可见地貌参数受岩性的影响并不大。

4.2　降水因素

降水是气候因素最直观的表现形式,降水量与河流径流量有关,在一定程度上决定了流域的侵蚀能力,是对地貌后期塑造不可忽视的因素。研究区位于山西南部,属半湿润大陆性季风气候,利用全球1960—1990 年的气象观测数据薄板样条内插结果[35],获取中条山及周边区域年均降雨量分布(图 9)。与区内绝对高程分布一致,山区降雨量高于平原区,高山区降雨量高于低山区,总体自北向南降水

量逐渐增大。如不考虑岩性、构造等因素,随着自北向南降雨对地表的侵蚀作用逐渐增强,面积高程积分值应逐渐变小,实际上却表现出相反的趋势,可见降水并不是影响流域地貌参数的主要因素。基岩区河流坡降指标均值、标准化陡峭指数值均在永济至解州一带表现出较高的值,可见这一带山体隆升强烈,亦表明新构造运动活跃,而山体的快速隆升造就的高山地形又导致了这一地区降水较多。因此,在某种程度上,降水的差异分布可能更多的受控于新构造运动。

4.3 构造因素

结合区域构造背景可知,中条山北麓的新构造运动受控于中条山北麓断裂。有关该断裂的分段及活动特征,前人已有大量研究[13,15-20]。就分段而言,根据断裂的地貌特征、几何展布及活动性,以西姚温及磨河为界,分为南段(韩阳段)、中段(解州段)、北段(夏县段)三段[13,15-16,20]。

早期研究认为,断裂中段活动最强,在全新世有过活动,北段次之,南段最弱,北段及南段仅在晚更新世有过活动[13]。程绍平等[15]也认为中段全新世活动,为整条断裂活动性最强的段落。

近年来,北京大学李有利课题组承担了中条山北麓断裂填图工作,对断裂几何展布、断错地貌以及晚第四纪活动习性开展了详细的研究。根据断裂活动错断的不同时期地貌面及位错量,获得不同部位晚更新世晚期以来垂直滑动速率(图10):南段据西姚温探槽揭露的地层年代及断距,得出13 ka BP以来的垂直滑动速率为0.23 mm·a^{-1}[20];中段据小李村探槽及李店探槽得出晚更新世晚期以来平均垂直滑动速率为0.7~0.9 mm·a^{-1}[18-19];北段据下溶底探槽揭露距今2万年以来垂直滑动速率为0.22~0.55 mm·a^{-1}[17]。

活动断裂滑动速率是晚第四纪构造变形的定量描述,是活动构造研究中的重要内容,是反映断裂活动性和地震危险性的重要参数之一[36-38]。从不同部位滑动速率值(图10)可见,南段与北段断裂晚第四纪以来活动强度大致接近,中段活动更强,总体上自北向南断裂活动呈现出逐渐增强的趋势,最强段位于中段西部的永济南一带。前已叙述,河流坡降指标均值、河道陡峭指数及面积高程积分值总体表现出自北向南逐渐增高的趋势,极大值均出现在永济至解州一带;河流裂点亦在永济至解州一带密集

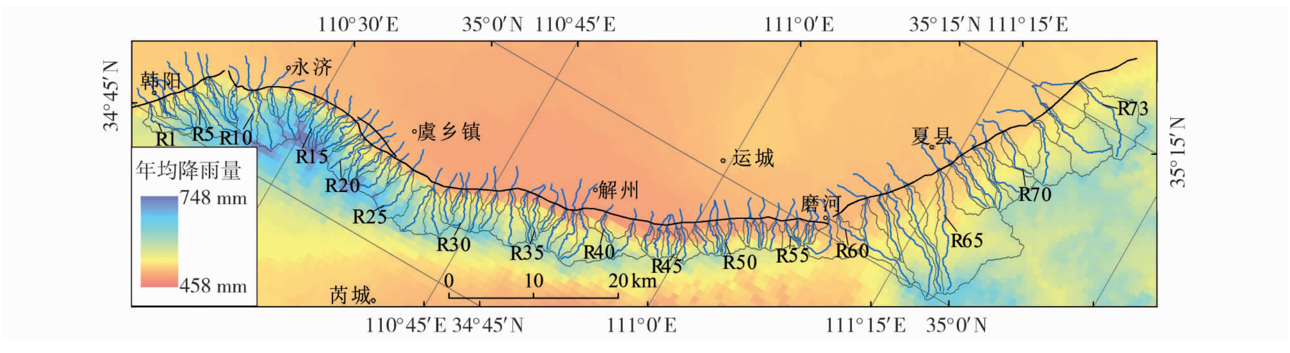


图9 中条山北麓及邻近地区1960—1990年均降雨量[35]

Fig. 9 1960—1990 annual precipitation of the Zhongtiao Mountain and its surrounding areas[35]

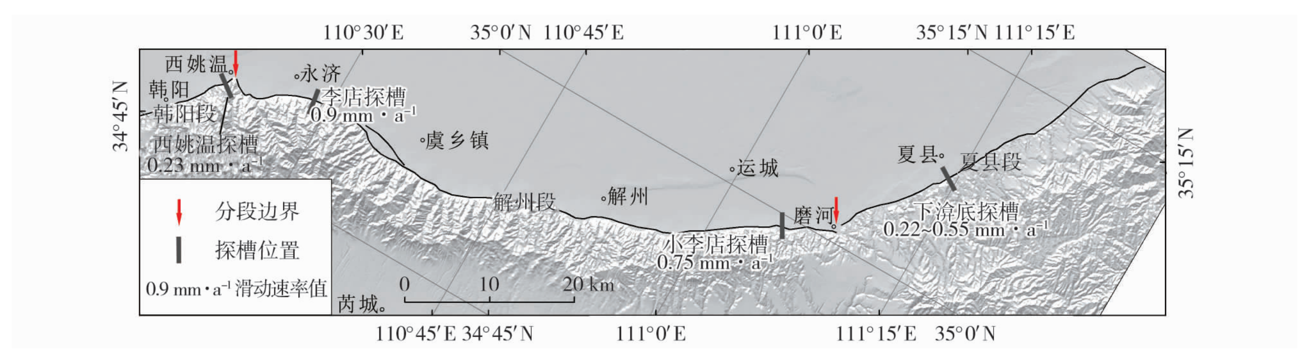


图10 中条山北麓断裂不同部位滑动速率值[17-20]

Fig. 10 Different slip rates along the northern Zhongtiao Mountain fault

分布。考虑到河流地貌参数受岩性及气候因素的影响并不显著,导致其空间差异分布主要受构造的作用,河流地貌参数自北向南逐渐增高表明新构造运动有逐渐增强的趋势。可见,基于河流地貌参数反映的新构造运动与通过对断裂调查得出的活动性一致,永济至解州一带多参数指标的高值分布亦反映这一带新构造运动最为活跃。

5　结 论

基于 DEM 数据,提取了中条山北麓 73 条主干河流及其所在的基岩区流域盆地,利用 GIS 空间分析技术,系统分析了河流地貌的多种参数指标,包括河流坡降指标、河道陡峭指数、流域盆地面积高程积分。综合分析影响这些指标的主要因素,结合区域地质背景及前人研究成果,分析中条山北麓河流地貌参数及其构造意义。研究表明,中条山北麓河流地貌参数空间上差异特征显著,河流坡降指标均值、河道陡峭指数以及面积高程积分值总体表现出自北向南逐渐增高的趋势,极大值均出现在永济至解州一带。综合分析岩性、降水、构造等因素认为,构造是造成河流地貌参数空间差异分布的主因,新构造运动总体表现出自北向南逐渐增大的趋势,永济至解州一带地貌参数的高值分布正是河流地貌参数对持续强烈的新构造运动的响应。河流裂点在永济至解州一带密集分布,陡峭指数的异常偏高亦反映这一区域长期处于快速的构造隆升,未达到均衡状态。可见,利用河流地貌参数分析得出中条山北麓新构造运动强弱与前人通过地质手段得出的结论一致,表明利用河流地貌参数来研究区域的新构造运动,是一种行之有效的方法。

参考文献(References)

[1] HAMDOUNI R E, IRIGARAY C, FERNANDEZ T, et al. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain)[J]. Geomorphology, 2008, 96: 150－173.

[2] ALIPOOR R, POORKERMANI M, ZARE M, et al. Active tectonic assessment around Rudbar Lorestan dam site, High Zagros Belt (SW of Iran)[J]. Geomorphology, 2011, 128: 1－14.

[3] FONT M, AMORESE D, LAGARDE J L. DEM and GIS analysis of the stream gradient index to evaluate effects of tectonics: The Normandy intraplate area (NW France)[J]. Geomorphology, 2010, 119: 172－180.

[4] 常直杨,王建,白世彪,等. 基于 DEM 的白龙江流域新构造运动定量分析[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 292－301. [CHANG Zhiyang, WANG Jian, BAI Shibiao, et al. Appraisal of active tectonic in Bailongjiang Basin based on DEM data[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(2): 292－301.]

[5] 张会平,杨农,刘少峰,等. 数字高程模型(DEM)在构造地貌研究中的应用新进展[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 660－669. [ZHANG Huiping, YANG Nong, LIU Shaofeng, et al. Recent progress in the DEM-based tectonogeomorphic study[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(6): 660－669.]

[6] 徐岳仁,何宏林,邓起东,等. 山西霍山山脉河流地貌定量参数及其构造意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(4): 746－759. [XU Yueren, HE Honglin, DENG Qidong, et al. Quantitative river geomorphic parameters surround Mts. Huoshan, Shanxi Province and their tectonic implications[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(4): 746－759.]

[7] TSODOULOS I M, KOUKOUVELAS I K, PAVLIDES S. Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, Central Greece)[J]. Tectonophysics, 2008, 453(1): 211－232.

[8] LARUE J P. Longitudinal profiles and knickzones: The example of the rivers of the Cher Basin in the northern French Massif Central[J]. Proceedings of the Geologists Association, 2011, 122(1): 125－142.

[9] 李宗盟,高红山,潘保田,等. 贺兰山水系流域数值地貌特征及其构造指示意义[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 422－429. [LI Zongmeng, GAO Hongshan, PAN Baotian, et al. Geomorphic indices of the river and drainage in Helan Mountain and its indication to tectonics[J]. Arid land geography, 2012, 35(3): 422－429.]

[10] 赵国华,李勇,颜照坤,等. 龙门山中段山前河流 Hack 剖面和面积—高程积分的构造地貌研究[J]. 第四纪研究, 2014, 34(2): 302－311. [ZHAO Guohua, LI Yong, YAN Zhaokun, et al. Tectonic geomorphology analysis of piedmont rivers of the middle Mt. Longmenshan based on Hack profile and hypsometric integral[J]. Quaternary Sciences, 2014, 34(2): 302－311.]

[11] 张天琪,王振,张晓明,等. 北天山乌鲁木齐河流域面积——高程积分及其地貌意义[J]. 第四纪研究, 2015, 35(1): 60－70. [ZHANG Tianqi, WANG Zhen, ZHANG Xiaoming, et al. Hypsometric integral analysis of the Urumqi River drainage basin and its implications for topographic evolution[J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(1): 60－70.]

[12] 徐伟,刘志成,袁兆德,等. 华山山前河流地貌参数及其构造意义研究[J]. 地震地质, 2017, 39(6): 1316－1335. [XU Wei, LIU Zhicheng, YUAN Zhaode, et al. River geomorphic parameters and their tectonic implications of Huashan[J]. Seismology and Geology, 2017, 39(6): 1316－1335.]

[13] 苏宗正,程新原,安卫平,等. 山西运城盆地的中条山断裂[M]. 活动断裂研究(8). 北京: 地震出版社, 2001, 120－130. [SU Zongzheng, CHENG Xinyuan, AN Weiping, et al. Study on Zhongtiaoshan active fault in Yuncheng Basin of Shanxi Province, China[M]// Research on Active Fault(8). Beijing: Seismological Press, 2001, 120－130.]

[14] 王向阳,张晓红,黄春玲,等. 中条山北麓断裂形变异常的研究[J]. 山西地震, 2004, (1): 25－28. [WANG Xiangyang, ZHANG Xiaohong, HUANG Chunling, et al. Study on the ground deforma-

tion anomaly of the fault at north Zhongtiao Mountain[J]. Earthquake Research in Shanxi,2004,(1):25－28.]

[15] 程绍平,杨桂枝. 山西中条山断裂带的晚第四纪分段模型[J]. 地震地质,2002,24(3):289－302.[CHENG Shaoping,YANG Guizhi. Late Quaternary segementation model of the Zhongtiaoshan Fault,Shanxi Province[J]. Seismology and Geology,2002,24(3):289－302.]

[16] 王怡然,李有利,闫冬冬,等. 中条山北麓断裂中南段全新世地震事件的初步研究[J]. 地震地质,2015,37(1):1－12.[WANG Yiran,LI Youli,YAN Dongdong,et al. Holocene paleoseismology of the middle and south segment of the north Zhongtiaoshan Fault Zone,Shanxi[J]. Seismology and Geology,2015,37(1):1－12.]

[17] 苗德雨,李有利,吕胜华,等. 山西中条山北麓断裂夏县段新构造运动[J]. 地理研究,2014,33(4):665－673.[MIAO Deyu,LI Youli,LV Shenghua,et al. Neotectonic activity in Xiaxian Segment of the north Zhongtiao Moutain Fault Zone,Shanxi[J]. Geographical Research,2014,33(4):665－673.]

[18] 司苏沛,李有利,吕胜华,等. 山西中条山北麓断裂盐池段全新世古地震事件和滑动速率研究[J]. 中国科学:(地球科学),2014,44(9):1958－1967.[SI Supei,LI Youli,LV Shenghua,et al. Holocene slip rate and paleoearthquake records of the Salt Lake segment of the northern Zhongtiaoshan Fault,Shanxi Province[J]. Science China:(Earth Science),2014,44(9):1958－1967.]

[19] 田建梅,李有利,司苏沛,等. 中条山北麓中段洪积扇上全新世断层陡坎的发现及其新构造意义[J]. 北京大学学报(自然科学版),2013,49(6):986－992.[TIAN Jianmei,LI Youli,SI Supei,et al. Discovery and neotectonic significance of fault scarps on alluvial fans in the middle of northern of the Zhongtiao Mountains[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2013,49(6):986－992.]

[20] LV S,LI Y,WANG Y,et al. The Holocene Paleoseismicity of the north Zhongtiaoshan Faults in Shanxi Province,China[J]. Tectonophysics,2014,623(7):67－82.

[21] 慈洪娟,闫冬冬,李有利,等. 中条山北麓韩阳段冲沟发育及其新构造意义[J]. 水土保持研究,2016,23(4):363－367.[CI Hongjuan,YAN Dongdong,LI Youli,et al. Geomorphic indices in the Hanyang Segment of Zhongtiaoshan Moutains,Shanxi and its implication for neotectonics[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(4):363－367.]

[22] 王乃樑,杨景春,夏正楷,等. 山西地堑系新生代沉积与构造地貌[M]. 北京:科学出版社,1996.[WANG Nailiang,YANG Jingchun,XIA Zhengkai,et al. Cenozoic deposits and tectonic geomorphlogy of Shanxi Graben[M]. Beijing:Science Press,1996.]

[23] 刘建辉. 贺兰山、秦岭山脉新生代伸展隆升及断层摩擦生热磷灰石裂变径迹分析[D]. 北京:中国地震局地质研究所,2009.[LIU Jianhui. Apatite Fission Track(AFT) analysis of the cenozoic extensional exhumation and uplift of the Helan Shan and the Qinling Mountains,and frictional heating along active faults[D]. Beijing:Institute of Geology,China Earthquake Administration,2009.]

[24] 王强,李彩光,田国强,等. 7.1 Ma 以来运城盆地地表系统巨变及盐湖形成的构造背景[J]. 中国科学(D 辑),2000,30(4):420－428.[WANG Qiang,LI Caiguang,TIAN Guoqiang,et al. The great change of surface system of the Yuncheng Basin and the evolutional tectonic background of salty lake since 7.1 Ma[J]. Science in China(Series D),2000,30(4):420－428.]

[25] HACK J T. Stream-profile analysis and stream-gradient index[J]. U. S. Geological Survey Journal Research,1973,1:421－429.

[26] DEHBOZORGI M,POURKERMANI M,ARIAN M,et al. Quantitative analysis of relative tectonic activity in the Sarvestan area,central Zagros,Iran[J]. Geomorphology,2010,121:329－341.

[27] REBAI N,ACHOUR H,CHAABOUNI R,et al. DEM and GIS analysis of sub-watersheds to evaluate relative tectonic activity:A case study of the north-south axis (Central Tunisia)[J]. Earth Science Informatics,2013,6:187－198.

[28] FLINT J J. Stream gradient as a function of order,magnitude,and discharge[J]. Water Resources Research,1974,10(5):969－973.

[29] HOWARD A D,KERBY G. Channel changes in badlands[J]. Geological Society of America Bulletin,1983,94:739－752.

[30] HU X F,PAN B T,KIRBY E,et al. Spatial differences in rock uplift rates inferred from channel steepness indices along the northern flank of the Qilian Mountain,northeast Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2010,55(27－28):3205－3214.

[31] SNYDER N P,WHIPPLE K X,TUCKER G E,et al. Landscape response to tectonic forcing:Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region,northern California[J]. Geological Society of America Bulletin,2000,112(8):1250－1263.

[32] KIRBY E,WHIPPLE K X,TANG W,et al. Distribution of active rock uplift along the eastern margin of the Tibetan Plateau:Inferences from bedrock channel longitudinal profiles[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,2003,108(4):2217.

[33] STRAHLER A N. Hypsometric (area to altitude) analysis of erosional topography[J]. Bulletin of the Geological Society of America,1952,63:1117－1142.

[34] 陈彦桀. 台湾山脉的构造地形指标特征——以面积高度积分、地形碎形参数与河流坡降指标为依据[D]. 台南:国立成功大学,2004.[CHEN Yanjie. Morphotectonic features of Taiwan Mountain Belt based on Hypsometric Integral,Topographic Fractals and SL index[D]. Tainan:National Cheng Kung University,2004.]

[35] HIJMANS R J,CAMERON S E,PARRA J L,et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas[J]. International Journal of Climatology,2005,25:1965－1978.

[36] 邓起东,苏宗正,王挺梅,等. 临汾盆地地震构造基本特征和潜在震源区的划分[M]//马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾. 北京:地震出版社. 1993:67－95.[DENG Qidong,SU Zongzheng,WANG Tingmei,et al. The basic characteristic of the seismogenic structure and the zonation of the potential seismic zone in the Linfen Basin[M]//MA Zongjin,ed. Earthquake Research and Systematical Disaster Reduction in Linfen,Shanxi. Beijing:Seismological Press,1993:67－95.]

[37] 张培震,王敏,甘卫军,等. GPS 观测的活动断裂滑动速率及其对现今大陆动力作用的制约[J]. 地学前缘(中国地质大学,北

京),2003,10(S1):81 －92. [ZHANG Peizhen, WANG Min, GAN Weijun, et al. Slip rates along major active faults from GPS measurements and constraints on contemporary continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing),2003,10(S1):81 －92.]

[38] 扈桂让,李自红,闫小兵,等.韩城断裂晚第四纪活动性研究[J].地震地质,2017,39(1):206 －217. [HU Guirang, LI Zihong, YAN Xiaobing, et al. The study of Late Quaternary activity of Hancheng Fault[J]. Seismology and Geology,2017,39(1):206 －217.]

River geomorphic parameters and their neotectonic significance of the northern piedmont of the Zhongtiao Mountain

XU Wei,　YUAN Zhao-de,　LIU Zhi-cheng,　GAO Zhan-wu

(*China Earthquake Disaster Prevention Center*, *Beijing* 100029, *China*)

Abstract: Based on the Digital Elevation Model and Geographic Information System technology, we extract and analyze the geomorphic parameters which include stream length-gradient index, channel steepness index and hypsometric integral of the northern piedmont of the Zhongtiao Mountain, Shanxi Province, China. The results showed that the values of stream length-gradient index, channel steepness index and hypsometric integral index were increased gradually from north to south in general and the high values of the parameters were all distributed in the south part between Yongji and Haizhou. The knickpoints which represent the spatial or temporal adjustment of tectonic movement are densely distributed in the part south of Haizhou whereas in the part north of Haizhou the knickpoints were distributed sporadically. Comprehensively analyzing the main factors including rocks, precipitation and tectonics that affect geomorphic parameters, we reached the conclusion that tectonics is the major factor that controls the development of the watershed topographic features and the tectonic activity was increased gradually from the north to the south. The northern piedmont tectonic activity of the Zhongtiao Mountain is mainly controlled by the northern Zhongtiao Mountain Fault according to regional geological tectonic background. The field geological investigation combined with previous studies show that the north Zhongtiao Mountian Fault can be divided into the south section, the middle section, and the north section according to their different geometric trending and fault activities by Xiyaowen village and Mohe village. Fault slip rate which is an important index to judge fault activity in the middle section is higher than that in the south and the north sections and the maximum value is distributed in the south of Yongji. The tectonic activity of the north piedmont of Zhongtiao Mountain gained from geomorphic parameters is consistent with the fault activity since the late Quaternary. In the north section, as the weak fault activity, we can see the flat pediment which is retreated by the long-term erosion of the Zhongtiao Mountain is as wide as 10 km. However, in the middle section, steep mountain landforms are formed due to the constant strong tectonic activity, and they become more and more striking from the north to the south. The highest peak Snow Mountain which is located at the south of Yongji shows that in this part the fault is the most active, and this is consistent with the high value obtained from geomorphic parameters. Utilize the river geomorphic parameters as the study objects of the tectonic activity can effectively reflect the regional tectonic movement. It provides a new perspective for discussing the relative activity strength in river drainage.

Key words: the northern piedmont of the Zhongtiao Mountain; river geomorphic parameter; neotectonic movement